中国生态农业学报 2017 年 9 月 第 25 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2017, 25(9): 1317−1325

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170174

霍昭光, 孙志浩, 邢雪霞, 卫宣志, 李晓辉, 刘超, 薛刚, 徐世晓, 杨铁钊. 北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1317−1325

Huo Z G, Sun Z H, Xing X X, Wei X Z, Li X H, Liu C, Xue G, Xu S X, Yang T Z. Effects of water and fertilizer integration on growth, morphology, physiology and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco in the North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1317−1325

北方烟区水肥一体化对烤烟生长、根系形态、生理及光合特性的影响*

霍昭光, 孙志浩, 邢雪霞, 卫宣志, 李晓辉, 刘　超,
薛　刚, 徐世晓, 杨铁钊**

(河南农业大学烟草学院　郑州　450002)

摘　要: 干旱抑制北方烟区烤烟的生长发育, 造成烟叶产量、质量下降。为探讨北方烟区水肥一体化对烤烟田间生长、根系形态生理和光合特性的影响, 以'云烟 87'为试验材料, 研究了烤烟农艺性状、干物质积累量、根系形态和生理活性、光合作用、叶绿素荧光特性以及烤后烟叶经济性状在水肥一体化和沟灌常规施肥 2 个不同处理下的差异。结果显示, 与沟灌常规施肥处理相比, 水肥一体化能够促进烤烟生长发育, 使田间农艺性状表现良好。水肥一体化能够明显提高根系和地上部干物质积累量, 降低根冠比, 显著增加根系体积、总吸收面积、活跃吸收面积和比表面积以及根系活力、ATPase 等相关根系形态和生理活性($P<0.05$)。在水肥一体化下, 烤烟叶片的光合作用指标净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和水分利用效率(WUE)以及叶绿素荧光参数 PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学量子效率($\Phi_{PSⅡ}$)和光化学淬灭系数(q_p)均显著高于沟灌常规施肥($P<0.05$), 而蒸腾速率(T_r)、非光化学淬灭系数(NPQ)则明显较低($P<0.05$); 同时, 其烤后烟叶的经济性状显著高于沟灌常规施肥处理($P<0.05$)。研究表明, 水肥一体化可以创造良好的根系形态, 提高根系生理活性, 增强光合作用和光能利用效率, 从而促进烤烟生长发育, 有助于提高烤后烟叶的经济性状。

关键词: 水肥一体化; 烤烟; 根系形态生理; 光合特性; 叶绿素荧光; 经济性状
中图分类号: S311　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)09-1317-09

Effects of water and fertilizer integration on growth, morphology, physiology and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco in the North China*

HUO Zhaoguang, SUN Zhihao, XING Xuexia, WEI Xuanzhi, LI Xiaohui, LIU Chao,
XUE Gang, XU Shixiao, YANG Tiezhao**

(College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Drought stress inhibits the growth and development of flue-cured tobacco in the North China, resulting in lower yield and quality. The purpose of this study was to determine the effects of integration of water and fertilizer on the growth and development, root morphology and physiology, and on photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco in the North China.

* 中国烟草总公司河南省公司科技项目(HYKJZD201401)资助
** 通讯作者: 杨铁钊, 主要从事烟草遗传育种研究。E-mail: yangtiezhao0102@126.com
霍昭光, 主要从事烟草品质遗传改良研究。E-mail: linyingxian2006@126.com
收稿日期: 2017-03-02　接受日期: 2017-05-26
* This work was supported by the Project of Henan Provincial Tobacco Company (HYKJZD201401).
** Corresponding author, E-mail: yangtiezhao0102@126.com
Received Mar. 2, 2017; accepted May 26, 2017

The differences in agronomic attributes, dry matter accumulation, root morphology and physiology, photosynthesis, chlorophyll fluorescence and economic characteristics of ‘Yunyan 87’ flue-cured tobacco grown under water and fertilizer integration, and conventional irrigation and fertilization were investigated. The results showed that compared with conventional irrigation and fertilization, the growth and development of flue-cured tobacco was significantly promoted under water and fertilizer integration and with better agronomic attributes. The integration of water and fertilizer significantly increased dry matter accumulation in the belowground and aboveground parts of the plant. It also improved the indices for root morphology and physiology in terms of root volume, total root absorption area, root active absorption area, root specific surface area, root activity and ATPase activity. All these attributes were significantly higher than those under conventional irrigation and fertilization. The integration of water and fertilizer also reduced root to shoot ratio ($P < 0.05$). Meanwhile, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), water use efficiency (WUE), PSII maximal photochemical efficiency (F_v/F_m), PSII actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}) and photochemical quenching coefficient (qP) all significantly increased under the integration of water and fertilizer ($P < 0.05$). On the contrary, both transpiration rate (T_r) and non-photochemical quenching coefficient (NPQ) significantly decreased under the integration of water and fertilizer ($P < 0.05$). Furthermore, the economic characteristics were significantly higher under the integration of water and fertilizer than those under conventional irrigation and fertilization ($P < 0.05$). In conclusion, the results indicated that the integration of water and fertilizer supported good root morphology and significantly improved root physiology activity, photosynthesis and light energy utilization efficiency. This stimulated the growth and development of flue-cured tobacco, resulting in higher economic characteristics.
Keywords: Water and fertilizer integration; Flue-cured tobacco; Root morphology and physiology; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence; Economic characteristics

土壤所含的水分与营养养分是作物生长发育的必需条件[1-3]。大量研究表明，合理的水肥管理可使作物生长发育和土壤状况得到改善，是作物获得丰产、优质的关键，并且能够增加水分、肥料利用效率[4-6]。水肥一体化又被称为微灌施肥技术，是将微灌和施肥相结合的农业工程技术，具有节水、省肥的优点。其主要原理是将肥料溶解于水中，依靠压力系统或地形高度落差，同时进行灌溉和施肥，能够适时、定量地满足作物对养分、水分的需要，实现对水、肥的同步管理和高效利用[7]。与传统水肥施用技术相比，水肥一体化具有定量供肥、供水以及水肥利用效率高等优点，能够根据土壤特性、作物根系特征与需水规律对养分、水分进行精确调控[8-9]。水肥一体化已在多种作物上得到推广应用，具有明显的增产效果，并且还能够提高农产品质量安全、改善土壤微环境和减少环境污染[10-11]。

根系作为作物吸收、运输水分和养分的主要器官，其功能的发挥受到外界环境的直接影响[12]。大量研究与实践证实，作物的光合作用以及产量、品质的形成主要依靠土壤内的水、肥供应[13]。烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)生育期内频繁发生不同程度的干旱是限制北方烟叶生产发展的主要气象因素，严重降低烟株对肥料的利用率，导致烟叶产、质量不稳定[14]。现阶段，水肥一体化已在我国北方烟区烤烟生产中得到应用，有利于节水、省肥，促进烤烟生长发育，表现出良好的增加烟农收益、改善烟叶品质的优势[15]。但目前关于水肥一体化影响烤烟根系形态生理、光合特性的研究报道还较少。因此，本文从烤烟农艺性状、干物质积累量、根系形态与生理活性、光合作用、叶绿素荧光特性以及烤后烟叶经济性状等方面入手，探讨水肥一体化对烤烟生长发育的调控机制，以期为烤烟水肥一体化的推广应用提供科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试验于2015—2016年在河南省方城县赵河镇楼上村进行，以烤烟品种‘云烟87’为试验材料。当地海拔114 m，东经113°23′，北纬33°15′。土壤类别是黄褐土，土壤肥力均匀、地面平整。基本化学性状为：有机质15.11 g·kg^{-1}，速效氮80.25 mg·kg^{-1}，速效磷15.52 mg·kg^{-1}，速效钾98.79 mg·kg^{-1}，pH 7.35。

1.2 试验设计

试验共设 2 个处理：水肥一体化(T)和沟灌常规施肥(对照, CK)。采用大区种植，每个处理 1.67 hm^2，共计 3.33 hm^2，行、株距分别为 110 cm、55 cm，在移栽后 60 d 时进行打顶。2 个处理的纯氮、磷和钾素田间施入量分别为 52.5 kg·hm^{-2}、105 kg·hm^{-2} 和 277.5 kg·hm^{-2}。沟灌常规施肥处理下肥料用量及施用方式分别为：芝麻饼肥 450 kg·hm^{-2}、过磷酸钙 [$Ca(H_2PO_4)_2·H_2O$] 150 kg·hm^{-2} 和烟草专用复合肥 300 kg·hm^{-2} 作为基肥在移栽前进行条施，硝酸钾(KNO_3) 75 kg·hm^{-2}、硫酸钾(K_2SO_4) 375 kg·hm^{-2} 在团棵期作为追肥进行穴施；采用沟灌浇水。在水肥一

体化处理下，采用移动式水肥一体机(由汽油机水泵、过滤器、施肥桶、空气阀等部件构成)进行施肥、浇水，管网系统由主管道(PE 材质，直径 63 mm)连接贴片式滴管带(PE 材质，直径 16 mm，滴头间距 30 cm)组成。芝麻饼肥 450 kg·hm^{-2} 和过磷酸钙[$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$] 150 kg·hm^{-2} 作为基肥条施，采用本课题组研制的烟草专用液体肥料(含氮、磷和钾素)在移栽后 0 d、20 d、30 d、40 d 和 50 d 时溶于水中进行滴灌追肥，纯氮施入量分别为 7.5 kg·hm^{-2}、7.5 kg·hm^{-2}、15 kg·hm^{-2}、18.75 kg·hm^{-2} 和 3.75 kg·hm^{-2}，在 60 d、70 d 时均追施硫酸钾(K_2SO_4)75 kg·hm^{-2}，每次滴灌追肥用水量达 90 m^3·hm^{-2}(进行滴灌追肥时，单个滴头滴水量为 0.002 m^3，用时 1.5 h，1 hm^2 烟地共计含有 30 000 个滴头)。滴灌常规施肥的田间灌水量及时间均与水肥一体化处理保持一致，2 个处理全生育期田间灌水总量均为 630 m^3·hm^{-2}，试验水源由当地烟水配套工程修建的 500 m^3 蓄水池提供。其他生产措施均按当地优质烟叶生产管理规程进行。

移栽后75 d时，按照五点取样法选择2个处理中具有典型代表性的烟株各200株，挂牌标记，用于农艺性状、根系形态与生理、光合作用和叶绿素荧光测定以及烤后烟叶经济性状统计。选取所标记烟株的第10叶位叶片(从下向上数)进行光合作用和叶绿素荧光特性测定。此后，挖取整棵烟株，将植株完整根系用水清洗干净，吸干水分后分别称取地上部、根系鲜重，同时测定根系体积等形态参数以及根系活力、ATPase活性，然后在105 ℃杀青20 min，70 ℃烘干至恒重，进行干重称量，计算根冠比。各项指标重复测定4次。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　农艺性状测定

根据YC/T 142—1998农艺性状记载标准进行烤烟株高、茎围、节距、有效叶片数和最大叶长、叶宽等指标测定。

1.3.2　根系形态参数测定

采用排水法测定烤烟根系体积。利用甲烯蓝吸附法进行烤烟根系总吸收面积、活跃吸收面和比表面积的测定[16]。

1.3.3　根系活力测定

采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法进行烤烟根系活力测定[17]。

1.3.4　根系 ATPase 活性测定

将0.2 g新鲜烤烟根系和生理盐水按1∶9的比例配制出质量系数为10%的匀浆，在4 ℃、6 000 g·min^{-1}的条件下离心15 min，将生理盐水和离心上清液，按照1∶4的比例稀释成体积系数为2%的匀浆，此后按照试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)的试验步骤测定ATPase活性。

1.3.5　光合作用参数测定

根据陈征等[18]的测定方法，采用LI-6400便携式光合仪(Li-Cor Inc.，USA)测定烤烟叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO_2浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)，水分利用效率(WUE)由公式WUE=P_n/T_r得到[19]。测定时选择红蓝光源叶室，使用开放式气路，叶室温度设定为25 ℃，空气相对湿度为60%~70%，CO_2浓度为 400 μmol·mol^{-1}，光照强度为 1 000 μmol·m^{-2}·s^{-1}，光量子通量密度为800 mol·m^{-2}·s^{-1}。

1.3.6　叶绿素荧光特性测定

利用FMS-2脉冲调制式荧光仪，以烤烟叶脉为轴的对称点分别测量叶绿素荧光参数初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m、F_m')以及最小荧光(F_0')。参照Demming-Adams的方法计算可变荧光(F_v)、PS Ⅱ最大光化学效率(F_v/F_m)、PS Ⅱ实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(q_p)和非光化学猝灭系数(NPQ)[20]。

1.3.7　烤后烟叶经济性状统计

分别对挂牌标记烟株按不同处理统计烤后烟叶产量，依照烤烟42级国标(GB2635—92)对烤后烟叶进行分级，计算产值、均价与上等烟比例。

1.4　数据处理

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 16.0软件进行统计分析，采用Duncan's新复极差法检验显著性。

2　结果与分析

2.1　水肥一体化对烤烟农艺性状的影响

农艺性状是烟株生长协调性优劣的最直接体现。表1显示，水肥一体化处理对烤烟生长发育产生明显的促进作用，使其具有较好的农艺性状表现。与沟灌常规施肥相比，水肥一体化能够增加烟株的株高、茎围和最大叶面积，分别是对照处理的1.09倍、1.02倍和1.07倍，差异达显著水平。而节距、有效叶数在水肥一体化处理下也均高于沟灌常规施肥，但未达显著差异水平。

2.2　水肥一体化对烤烟干物质积累量的影响

烤烟干物质积累量可以反映烟株的生长发育状况。从表2可以看出，和对照处理相比，烤烟的地上部鲜重、根系鲜重、地上部干重和根系干重在水肥一体化条件下均显著增加，增幅分别达14.15%、18.51%、21.95%和18.68%。同时，水肥一体化处理使烤烟的根冠比下降，降幅为2.48%，且与沟灌常规施肥达显著差异水平。

表 1 水肥一体化对烤烟农艺性状的影响

Table 1 Effect of integration of water and fertilizer on agronomical characters of flue-cured tobacco

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎围 Stem girt (cm)	节距 Nodes space (cm)	有效叶数 Number of productive leaves	最大叶面积 Maximum leaf area (cm^2)
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	131.16±24.82a	10.04±2.18a	4.37±0.36a	21.8±6.64a	3 002.57±121.83a
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertilization	119.84±25.06b	9.82±1.15b	4.31±0.38a	20.3±4.16a	2 805.92±103.29b

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

表 2 水肥一体化对烤烟干物质积累量的影响

Table 2 Effect of integration of water and fertilizer on dry matter accumulation of flue-cured tobacco

处理 Treatment	地上部鲜重 Fresh weight of aboveground (g)	根系鲜重 Root fresh weight (g)	地上部干重 Dry weight of above-ground (g)	根系干重 Root dry weight (g)	根冠比 Root/shoot ratio
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	1 727.22±81.29a	118.35±20.08a	196.02±32.83a	30.68±7.82a	0.157±0.002b
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertilization	1 513.17±68.73b	99.86±21.25b	160.74±30.36b	25.85±4.27b	0.161±0.003a

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

2.3 水肥一体化对烤烟根系形态的影响

根系体积直接体现烤烟根系的生长发育是否良好，影响烟株对水分、矿质营养的吸收和转运。根系总吸收面积、活跃吸收面积和比面积等根系形态特征可以反映根系的生理活性高低，与光合活动强度、单叶重以及烟碱、钾含量均具有极显著或显著的正相关关系。表3显示，与对照沟灌常规施肥相比，水肥一体化处理下烤烟的根系体积、总吸收面积、活跃吸收面积和比表面积均较高，分别是对照的1.11倍、1.25倍、1.12倍和1.13倍，且差异达显著水平。

表 3 水肥一体化对烤烟根系形态的影响

Table 3 Effect of integration of water and fertilizer on root morphology of flue-cured tobacco

处理 Treatment	根体积 Root volume (mL)	总吸收面积 Total absorption area (m^2)	活跃吸收面积 Active absorption area (m^2)	比表面积 Specific surface area ($m^2 \cdot m^{-3}$)
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	303.38±52.72a	106.63±14.63a	36.69±5.27a	0.35±0.042a
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertilization	274.27±45.28b	85.46±13.94b	32.85±6.03b	0.31±0.037b

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

2.4 水肥一体化对烤烟根系生理活性的影响

烤烟根系活力较高，可以满足烟株生长发育所需的营养元素和水分，是根系代谢能力强的重要标志。ATPase属于能量代谢的关键酶，影响根系对营养物质和水分的吸收、运输等一系列活动，其活性高低能够代表根系代谢活动旺盛与否。从表4可以看出，根系活力、ATPase活性在水肥一体化条件下较高，而沟灌常规施肥处理则具有较低的根系活力和ATPase活性。水肥一体化处理的根系活力、ATPase活性较对照分别上升43.08%、31.84%，且达显著差异水平。

2.5 水肥一体化对烤烟光合作用的影响

光合作用是作物生长发育和产量品质形成的关键，水分与营养成分的变化状况是影响作物光合活动的重要限制因素。表5显示，和沟灌常规施肥处理相比，水肥一体化能够显著提高烤烟叶片的P_n、G_s、C_i和WUE，增幅分别为31.44%、59.09%、21.75%和

表 4 水肥一体化对烤烟根系生理活性的影响

Table 4 Effect of integration of water and fertilizer on root physiology activity of flue-cured tobacco

处理 Treatment	根系活力 Root activity [$\mu g \cdot g^{-1}(FW) \cdot h^{-1}$]	ATPase [$\mu g(Pi) \cdot g^{-1}(FW) \cdot h^{-1}$]
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	40.72±6.95a	137.83±16.53a
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertilization	28.46±8.17b	104.54±14.29b

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

表 5　水肥一体化对烤烟光合作用的影响
Table 5　Effect of integration of water and fertilizer on photosynthesis of flue-cured tobacco

处理 Treatment	净光合速率(P_n) Net photosynthetic rate [μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]	气孔导度(G_s) Stomatal conductance [mol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]	胞间 CO_2 浓度(C_i) Intercellular CO_2 concentration [μmol(CO_2)·mol^{-1}(air)]	蒸腾速率(T_r) Transpiration rate [mmol(H_2O)·m^{-2}·s^{-1}]	水分利用效率(WUE) Water use efficiency [μmol(CO_2)·mol^{-1}(H_2O)]
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	26.67±2.83a	0.35±0.041a	248.96±27.73a	3.37±0.52b	7.91±0.77a
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertilization	20.29±2.76b	0.22±0.028b	204.49±20.48b	4.76±0.31a	4.26±0.63b

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

85.66%; 而T_r则明显下降, 降幅达29.20%。

2.6　水肥一体化对烤烟叶绿素荧光特性的影响

叶绿素荧光特性是植物光合活动变化的真实反映, 叶绿素荧光参数在评价光合作用中光系统对光能的吸收、传递等方面发挥独特作用。从表 6 可以看出, 水肥一体化下烟草叶片的 F_v/F_m、Φ_{PSII}和 q_p 分别是对照沟灌常规施肥处理的 1.12 倍、1.34 倍和 1.65 倍, 且差异达显著水平; 而NPQ则显著低于对照, 为对照的61.36%。

表 6　水肥一体化对烤烟叶绿素荧光特性的影响
Table 6　Effect of integration of water and fertilizer on chlorophyll fluorescence characteristics of flue-cured tobacco

处理 Treatment	PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m) PSⅡ maximal photo-chemical efficiency	PSⅡ实际光化学效率(Φ_{PSII}) PSⅡ actual photochemical efficiency	光化学猝灭系数(q_p) Photochemical quenching coefficient	非光化学猝灭系数(NPQ) Non-photochemical quenching coefficient
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	43.64±7.18a	24.49±3.74a	5.53±0.74a	0.27±0.005b
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertilization	39.05±6.34b	18.31±3.65b	3.36±0.68b	0.44±0.017a

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

2.7　水肥一体化对烤烟经济性状的影响

经济性状是衡量烤烟生产水平的关键指标。如表 7 所示, 在 2 个处理条件下, 水肥一体化处理下烤后烟叶的经济性状较高, 产量、产值、均价和上等烟比例均显著优于沟灌常规施肥。其产量、产值、均价分别比对照处理增加 312.43 kg·hm^{-2}、13 971.78 元·hm^{-2} 与 2.38 元·kg^{-1}, 同时, 上等烟比例也比沟灌常规施肥高 6.49 个百分点。

表 7　水肥一体化对烤烟经济性状的影响
Table 7　Effects of integration of water and fertilizer on economic characters of flue-cured tobacco

处理 Tratment	产量 Yield (kg·hm^{-2})	产值 Output (¥·hm^{-2})	均价 Average price (¥·kg^{-1})	上等烟比例 Ratio of high quality tobacco (%)
水肥一体化 Integration of water and fertilizer	3 112.38±120.17a	72 619.13±272.41a	23.33±3.28a	54.74±2.21a
沟灌常规施肥 Conventional irrigation and fertili-zation	2 799.95±118.35b	58 647.35±267.93b	20.95±1.66b	48.25±4.75b

同列不同字母表示两处理间差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences between two treatments at 0.05 level.

3　结论与讨论

根系是作物吸收生长发育所需水分、营养的主要器官, 其功能的发挥主要受到根系形态、生理特性的影响[21]。水、肥等外界环境条件的改变能够影响作物地上部、根系间的干物质分配量, 最终影响其产量水平。合理的灌溉、施肥等途径有利于促进根系生长, 增强根系形态和生理活性, 进而影响地上部形态建成,提高产量[22-23]。在本试验中, 与沟灌常规施肥相比, 水肥一体化下烤烟根系干物质积累量较高, 根系体积等形态参数明显增加, 且根系活力、ATPase活性较强, 有利于促进根系对水分、矿质营养的吸收, 有利于烤烟生长和产量形成。作物叶面积和生物积累量具有显著的正相关关系[24]。水肥一体化引起叶面积上升, 必然有利于烤烟的干物

质积累和产量形成。根冠比不但反映作物根系与地上部的生长发育状况和协调性，也是作物适应外界环境变化的重要标志[25]。水肥一体化条件下的根冠比较低，表明水肥一体化有利于根系和地上部的生长发育，为各自功能的发挥奠定基础。发达的根系有助于吸收更多的水分和营养养分，其与根系形态、生理特性指标的变化相一致[26]。Nejad[27]研究指出，当根系的结构或功能处于较均衡状态时，作物对资源的利用效率表现最佳。在水肥一体化生长条件下，烟株根系发育良好，这可能与土壤通透性、根际营养状况得到优化有关。烟株根系通透性在水肥一体化下得到改善，根际氧气浓度上升，可以减轻还原性物质对根系细胞的损害，使根系分生组织细胞分裂速度加快，细胞长度增加，侧根与不定根的数量上升，有利于烟株根系在土壤中的伸长与扩展，导致根系分布范围较广；同时，水肥一体化促进土壤中的有效氮供应量上升，烟株根际营养养分供应充足，有利于根系生长发育，对氮素的吸收、同化能力增强，从而提升氮肥利用率[28]。而在沟灌常规施肥模式下，烟株根系干物质量和根系体积等均较低，根系活力、ATPase等生理活性明显下降，表明沟灌常规施肥不利于根系生长发育。

光合作用是作物生长发育和产量、品质形成的基础，外界水分和营养养分均对光合产生关键影响[29]。水肥一体化明显提高烤烟叶片的P_n，说明烟株在水肥一体化处理下对水、肥的吸收均衡，有利于改善烟株体内的生理活性强度，增强对外界CO_2的捕获能力，导致光合作用强度上升。G_s在水肥一体化下增加，可以使CO_2的扩散阻力下降，有利于气孔和外界进行CO_2交换，促进P_n提高；而C_i上升，说明水肥一体化对叶肉细胞具有调节作用。水肥一体化处理下烟叶的T_r较小，显示出水肥一体化可以改善烟田的微气候环境，在一定程度上降低叶片的蒸腾失水，以保持烟株的正常生理活动。烤烟叶片在水肥一体化下具有较高的WUE，表明水肥一体化有助于烟株对水分的吸收、利用。这可能是由于水肥一体化可以及时、定量地提供水分、营养至烟株根际周围，且在土壤内的损失量低；使烟株根系显著增加，对水分、养分的吸收空间扩大，从而提高水分、养分利用效率，提高烟叶光合作用，可以积累更多的同化产物。

通过叶绿素荧光可以快速检测完整植株在外界环境胁迫下光合作用的真实反应，从而评价作物光合机构的功能与逆境胁迫的影响[30-31]。F_v/F_m表征PS Ⅱ的最大光化学效率，其不受作物种类的影响，主要受到外界环境因素和胁迫程度的作用[32]。$\Phi_{PS\,II}$是光照下PS Ⅱ反应中心在部分关闭状态下的实际光化学效率[33]。q_p代表PS Ⅱ反应中心的开放程度[29]。NPQ为衡量PS Ⅱ反应中心非辐射能量耗散的指标[34]。文中试验结果显示，和沟灌常规施肥处理相比，烤烟叶片的F_v/F_m、$\Phi_{PS\,II}$和q_p在水肥一体化下均较高，表明水肥一体化有助于PS Ⅱ更有效地捕获、利用光能，提高光合电子传递活性和PS Ⅱ光能转换效率，降低过剩激发能的产生，增强叶片对光能的吸收利用，从而促进烟株内同化力的形成，保证其对碳素的固定、同化。而NPQ出现显著下降，显示出水肥一体化可以使PS Ⅱ反应中心的激发能捕获效率上升[35]。烤烟叶片在水肥一体化条件下表现出较高的PS Ⅱ光能利用效率与光合作用潜力，是其增产的光合生理原因。

“有收无收在水，收多收少在肥”，水分与肥料的合理运筹对作物的生长发育产生直接的影响作用[36-38]。作物90%以上的产量主要来自光合作用[39]。Williams等[40]研究指出，目前增加作物产量的相关技术措施都已在生产中发挥作用，只有光合作用的增产潜力尚未发挥明显效应。在以后生产中，主要依靠增加光合活动转化效率以提升作物产量[41]。作物根系的生长发育状况与叶片光合生理特性联系密切。付景等[42]指出，增强超级稻结实后期根系生理活性，进而提高叶片光合作用是增加产量的重要途径。文中结果显示，水肥一体化处理明显促进烤烟生长发育，烟株的株高、茎围和最大叶面积均显著增加，且根系和地上部干物质积累量高，具有较好的田间农艺性状表现。这主要是由于水肥一体化有利于增强叶片光合作用，提高PS Ⅱ光能利用效率，能够向烟株提供较多的有机同化产物，从而使烤烟生长发育良好。经济性状是衡量某项技术的社会实际应用效果最直接的体现。在本研究中，水肥一体化处理下烤后烟叶的经济性状显著高于沟灌常规施肥处理，显示出利用水肥一体化有助于获得较高的产量与收益。这可能是由于水肥一体化优化了烤烟根系形态与生理特性，并且增强光合活动，促进了烟株对水、肥的高效吸收和利用。

综上所述，在本试验中，水肥一体化下烤烟叶片的 P_n、G_s、C_i 和 WUE 以及叶绿素荧光参数 F_v/F_m、$\Phi_{PS\,II}$和 q_p 均显著增加，而 T_r、NPQ 则明显低于沟灌常规施肥。这表明和沟灌常规施肥处理相比，烤烟叶片的光合性能、光能利用效率在水肥一体化下具有明显优势，且根系发育良好，根系活力、ATPase

生理活性较强，能为烟株发育提供所需的水分和有机营养，发挥“以水调肥、以肥促长”的作用[43-44]，使光合作用转化效率上升，田间农艺性状表现较好，从而为增加产量奠定基础，最终获得较高的经济性状[45]。水、肥的田间管理是影响作物生长发育与产量、质量水平提高的关键因素，缺一不可[46]。本文研究证实，水肥一体化能够将水分和肥料进行有机结合，通过两者间的相互促进效应减轻北方烟区干旱少雨对烟草生产的不利影响，促进烤烟生长发育，获得更高的生产效益。因此，本研究下一阶段将通过更大面积的生产示范以进一步验证水肥一体化的使用效果，从而通过生产实践为水肥一体化在北方烟区烤烟生产中的推广应用提供坚实可靠的理论依据。

参考文献 References

[1] 马兴华，张忠锋，荣凡番，等. 高低土壤肥力条件下烤烟对氮素吸收、分配和利用的研究[J]. 中国烟草科学，2009, 30(1): 1–4
Ma X H, Zhang Z F, Rong F F, et al. Studies on nitrogen absorption, distribution and utilization in flue-cured tobacco under higher and lower fertility conditions[J]. Chinese Tobacco Science, 2009, 30(1): 1–4

[2] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3–8

[3] 朱兆良，金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(2): 259–273

[4] 刘世全，曹红霞，张建青，等. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 1362–1371
Liu S Q, Cao H X, Zhang J Q, et al. Effects of different water and nitrogen supplies on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of small pumpkin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(4): 1362–1371

[5] 王海燕，高聚林，王志刚，等. 高密度对超高产春玉米花粒期叶片衰老与根系活力的影响[J]. 玉米科学，2012, 20(2): 75–81
Wang H Y, Gao J L, Wang Z G, et al. Effects of high planting density on super high-yielding spring maize leaf senescence and root activity at anthesis and kernel stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(2): 75–81

[6] 韦泽秀，梁银丽，周茂娟，等. 水肥组合对日光温室黄瓜叶片生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 69–74
Wei Z X, Liang Y L, Zhou M J, et al. Physiological characteristics of leaf growth and yield of cucumber under different watering and fertilizer coupling treatments in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 69–74

[7] 夏建华，王川，赵锦超，等. 烟草水肥一体化发展现状与应用前景[J]. 现代农业科技, 2016, (19): 63–64
Xia J H, Wang C, Zhao J C, et al. The development status and application prospects of integrated management of water and fertilizer in tobacco[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (19): 63–64

[8] 李铮，王晋民，王海景，等. 蔬菜日光温室问题调查与水肥一体化技术探讨[J]. 土壤, 2006, 38(2): 223–227
Li Z, Wang J M, Wang H J, et al. Problems with greenhouse and technology of integrated management of water and fertilizer[J]. Soils, 2006, 38(2): 223–227

[9] 康跃虎，王凤新，刘士平，等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 66–72
Kang Y H, Wang F X, Liu S P, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 66–72

[10] 杜社妮，白岗栓，梁银丽. 灌溉方式对黄瓜生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 浙江大学学报：农业与生命科学版, 2010, 36(4): 433–439
Du S N, Bai G S, Liang Y L. Effects of irrigation methods on cucumber growth, yield and water use efficiency[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2010, 36(4): 433–439

[11] 陈永顺，李敏侠，董燕，等. 水肥一体化新技术要点及其优势[J]. 现代农业科技, 2011, (19): 298
Chen Y S, Li M X, Dong Y, et al. New techniques of integration of water and fertilizer and its advantages[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011, (19): 298

[12] Courtois B, Ahmadi N, Khowaja F, et al. Rice root genetic architecture: Meta-analysis from a drought QTL database[J]. Rice, 2009, 2(2/3): 115–128

[13] 李广浩，赵斌，董树亭，等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1406–1415
Li G H, Zhao B, Dong S T, et al. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1406–1415

[14] 史宏志，范艺宽，刘国顺，等. 烟草水肥耦合机理研究现状和展望[J]. 河南农业科学, 2008, (10): 5–10
Shi H Z, Fan Y K, Liu G S, et al. Advances of studies on tobacco water-fertilizer coupling and its application[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2008, (10): 5–10

[15] 范艺宽. 优质烟水肥(药)一体化精准管理系统的实施[C]//中国烟草学会 2014 年学术年会论文集. 北京：中国烟草学会, 2014: 171–177
Fan Y K. Implementation of precision management system of water and fertilizer for high quality tobacco[C]//Proceedings of annual academic meeting of China Tobacco Society in 2014. Beijing: China Tobacco Society, 2014: 171–177

[16] 李合生，孙群，赵世杰，等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社, 2000
Li H S, Sun Q, Zhao S J, et al. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000

[17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京：中国农业出版社,

2000
Zou Q. Instruction of Experiment on Plant Physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
[18] 陈征, 许嘉阳, 范艺宽, 等. 不同烤烟品种幼苗形态结构及光合参数对干旱胁迫响应机制的差异[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1508–1520
Chen Z, Xu J Y, Fan Y K, et al. Response of morphological structure and photosynthetic parameters to water deficit in four flue-cured tobacco cultivar seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(11): 1508–1520
[19] Berry J, Bjorkman O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1980, 31: 491–543
[20] Demmig-Adams B, Adams Ⅲ W W, Baker D H, et al. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation[J]. Physiologia Plantarum, 1996, 98(2): 253–264
[21] 褚光, 周群, 薛亚光, 等. 栽培模式对杂交粳稻常优 5 号根系形态生理性状和地上部生长的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1245–1258
Chu G, Zhou Q, Xue Y G, et al. Effects of cultivation patterns on root morph-physiological traits and aboveground development of japonica hybrid rice cultivar Changyou 5[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(7): 1245–1258
[22] 焦娟玉, 尹春英, 陈珂. 土壤水、氮供应对麻疯树幼苗光合特性的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 91–99
Jiao J Y, Yin C Y, Chen K. Effects of soil water and nitrogen supply on the photosynthetic characteristics of *Jatropha curcas* seedlings[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(1): 91–99
[23] 陈国平. 玉米的干物质生产与分配(综述)[J]. 玉米科学, 1994, 2(1): 48–53
Chen G P. Dry matter production and distribution in maize[J]. Maize Science, 1994, 2(1): 48–53
[24] 祁虹, 段留生, 王树林, 等. 全生育期 UV-B 辐射增强对棉花生长及光合作用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 708–719
Qi H, Duan L S, Wang S L, et al. Effect of enhanced UV-B radiation on cotton growth and photosynthesis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 708–719
[25] 沈喜, 李红玉, 贾秋珍, 等. 条锈病对小麦(*Triticum aestivum* L.)叶片光合功能及光合功能蛋白 D1 表达的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 669–676
Shen X, Li H Y, Jia Q Z, et al. Influence of wheat (*Triticum aestivum* L.) stripe rust infection on photosynthetic function and expression protein D1 of what leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 669–676
[26] Huang B R, Fry J D. Root anatomical, physiological, and morphological responses to drought stress for tall fescue cultivars[J]. Crop Science, 1998, 38(4): 1017–1022
[27] Nejad T S. Effect of drought stress on shoot/root ratio[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 57: 598–600
[28] Jiang D, Dai T, Jing Q, et al. Effects of long-term fertilization on leaf photosynthetic characteristics and grain yield in winter wheat[J]. Photosynthetica, 2004, 42(3): 439–446
[29] Bilger W, Björkman O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*[J]. Photosynthesis Research, 1990, 25(3): 173–185
[30] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42: 319–359
[31] 刘丽琴, 张永清, 李鑫, 等. 烯效唑浸种对干旱胁迫下红小豆生长及其根系生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(1): 144–153
Liu L Q, Zhang Y Q, Li X, et al. Influence of seed soaking with uniconazole on growth and root physiological characteristics of adzuki bean under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(1): 144–153
[32] Aroca R, Irigoyen J J, Sánchez-Díaz M. Drought enhances maize chilling tolerance. Ⅱ. Photosynthetic traits and protective mechanisms against oxidative stress[J]. Physiologia Plantarum, 2003, 117(4): 540–549
[33] Santos C V. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 103(1): 93–99
[34] 林琭, 汤昀, 张纪涛, 等. 不同水势对黄瓜花后叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2030–2040
Lin L, Tang Y, Zhang J T, et al. Effects of different water potentials on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cucumber during post-flowering growth stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2030–2040
[35] 罗宏海, 张宏芝, 陶先萍, 等. 膜下滴灌条件下水氮供应对棉花根系及叶片衰老特性的调节[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2142–2150
Luo H H, Zhang H Z, Tao X P, et al. Effect of irrigation and nitrogen application regimes on senescent characters of roots and leaves in cotton with under-mulch-drip irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(10): 2142–2150
[36] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 36–46
Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(1): 36–46
[37] Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, et al. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 85–98
[38] 赵欢, 张萌, 秦松, 等. 贵州黄壤小白菜生长、品质、光合特性及氮素利用对新型肥料的响应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(10): 1320–1327
Zhao H, Zhang M, Qin S, et al. Response of Chinese cabbage growth, quality, photosynthesis and nitrogen utilization to new fertilizers in Guizhou yellow soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1320–1327

[39] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4770–4781
Ji L, Li T X, Zhang X Z, et al. Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(23): 4770–4781
[40] Williams B A, Gurner P J, Austin R B. A new infra-red gas analyser and portable photosynthesis meter[J]. Photosynthesis Research, 1982, 3(2): 141–151
[41] Raines C A. Increasing photosynthetic carbon assimilation in C_3 plants to improve crop yield: Current and future strategies[J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 36–42
[42] 付景, 陈露, 黄钻华, 等. 超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系[J]. 作物学报, 2012, 38(7): 1264–1276
Fu J, Chen L, Huang Z H, et al. Relationship of leaf photosynthetic characteristics and root physiological traits with grain yield in super rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(7): 1264–1276
[43] Aqueel M A, Leather S R. Effect of nitrogen fertilizer on the growth and survival of *Rhopalosiphum padi* (L.) and *Sitobion avenae* (F.) (Homoptera: Aphididae) on different wheat cultivars[J]. Crop Protection, 2011, 30(2): 216–221
[44] Sandhu S S, Mahal S S, Vashist K K, et al. Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various levels of nitrogen and irrigation in northwest India[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 32–39
[45] 袁仕豪. 水氮互作对烤烟氮素吸收利用及烟叶产量和品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008
Yuan S H. Effects of interaction of water and nitrogen on uptake and utilization of nitrogen and yield and quality of flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2008
[46] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 滴灌施肥条件下砂田设施甜瓜的水肥耦合效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2164–2173
Ma Z M, Du S P, Xue L. Coupling effects of water and fertilizer on melon in plastic greenhouse of gravel-mulched field under drip fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2164–2173